

Jacek Niedźwiecki, Guillaume Debaene, Alicja Pecio

*Institut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy
w Puławach*

KLASYCZNE I ZAAWANSOWANE METODY BADANIA
PRZESTRZENNEGO ZRÓŻNICOWANIA ŻYŻNOŚCI GLEB I ŁANU ROŚLIN*

Słowa kluczowe: rolnictwo precyzyjne, przestrzenna zmienność gleb, pomiary punktowe, pomiary ciągłe, czujniki glebowe i roślinne

Wstęp

W klasycznych badaniach chemicznorolniczych żyżność gleby w obrębie pola określa się na podstawie jednej próby zbiorczej, w której dokonuje się wyceny zasobności w podstawowe makroelementy oraz średniej wartości odczynu. Wciąż obowiązującym w Polsce standardem jest powierzchnia 4 ha. Na podstawie analizy próbki zbiorczej udziela się porad nawozowych, tzn. wyznacza się średnią dawkę nawozów dla całego pola. Uzyskane wyniki nie informują jednak o zmienności przestrzennej analizowanych właściwości na badanym polu. Metoda próby zbiorczej jest zatem wystarczająca dla małych gospodarstw, których pola zwykle nie przekraczają standardowej powierzchni lub są mniejsze. W okresie, kiedy liczba dużych pól, tzn. przekraczających powierzchnię 4 ha, zaczęła szybko zwiększać się, metoda próby zbiorczej przestała wystarczać ze względu na zmienność glebową. W związku z tym zaistniała konieczność bardziej precyzyjnego określania żyżności gleby w obrębie pola. Pojawiła się również koncepcja różnicowania dawki nawozów zależnie od miejscowo zróżnicowanej żyżności. Koncepcja ta od początku przyjęła nazwę „precyzyjnego nawożenia”. W systemie tym liczne średnie próbki gleb (do kilkuset) pobiera się do analiz najczęściej w wierzchołkach sieci kwadratów. Od 1994 r. w ten sposób pobierane są próbki na polu doświadczalnym Stacji Doświadczalnej IUNG-PIB w Baborówku o pow. 52,5 ha.

* Opracowanie wykonano w ramach zadania 1.2 w programie wieloletnim IUNG-PIB.

Stacja ta została powołana w 1993 r. z zadaniem badania przestrzennego zróżnicowania żyzności gleby i w perspektywie udzielania dokładnych porad nawozowych. Od początku została wyposażona w precyzyjny kombajn zbożowy Massey Ferguson MF 32, który umożliwiał określanie i gromadzenie informacji o przestrzennej zmienności plonów uprawianych roślin. Kombajn posiadał miernik izotopowy określający masę przepływającego ziarna z częstotliwością co 1,2 sekundy. Na kombajnie umieszczony był odbiornik GPS, który umożliwiał monitorowanie pozycji kombajnu w przestrzeni. Większą dokładność pozycjonowania kombajnu w SD Baborówko uzyskiwano dzięki stacji referencyjnej, czyli dodatkowemu odbiornikowi GPS umiejscowionemu w punkcie o znanych współrzędnych geograficznych, który komunikował się z odbiornikiem kombajnu za pomocą sygnału radiowego (metoda DGPS). Stację referencyjną umieszczono na obrzeżu pola doświadczalnego. Kombajn wyposażony był również w komputer pokładowy, który integrował i zapamiętywał dane napływające z miernika plonu oraz odbiornika GPS. W efekcie powstawał zbiór danych, który zawierał: czas pomiaru, długość i szerokość geograficzną punktu, w którym w danym czasie znajdował się kombajn oraz plon ziarna wyrażony w $t \cdot ha^{-1}$. Zbiór taki, przekształcony do formatu tekstowego, mógł być następnie importowany i analizowany za pomocą dowolnych programów komputerowych. Dzięki temu w systemie GIS zgromadzona została informacja o plonach wszystkich roślin uprawianych w Stacji od roku 1994 (9). Początkowo pole doświadczalne obejmowało 8 pól płodozmiennych. Od roku 2000 wprowadzono uproszczone zmianowanie: rzepak ozimy – pszenica ozima – jęczmień jary i dokonano nowego podziału całej powierzchni pola doświadczalnego na 3 pola płodozienne.

Żyzność gleby oraz różnego rodzaju pomiary i obserwacje, przy braku innych możliwości, wciąż wykonywano metodą pobierania próbek w stałych punktach pomiarowych. Punkty te umiejscowiono w wierzchołkach regularnej siatki kwadratów pokrywającej pole doświadczalne oraz wyznaczono ich współrzędne, początkowo kartograficzne w odniesieniu do reperów znajdujących się na obrzeżu pola, a potem geograficzne, za pomocą GPS. Dzięki temu każdy wykonany pomiar czy obserwacja zawsze były zorientowane przestrzennie. Rodzaj obserwacji i pomiarów wykonywanych w siatce zależał od potrzeb realizowanych aktualnie tematów i projektów badawczych. Najbogatsze zbiory danych zgromadzono od roku 1996 dla pszenicy ozimej (3, 4, 5, 11, 12) oraz dla jęczmienia jarego w latach 1998–2003 (28, 29). Obejmują one: pomiary dynamiki LAI (indeksu powierzchni liściowej), SPAD (wskaźnika „zieloności liści”), plonu suchej masy roślin, zawartości azotu w nadziemnej masie roślin, obserwacje faz fenologicznych, plony ziarna i słomy z „metrówek” oraz zawartości makroskładników w plonie. Oprócz obserwacji ładu prowadzono także pomiary zawartości wody w profilu glebowym za pomocą sondy neutronowej (15) oraz pomiary zawartości azotu mineralnego w glebie (27).

Zgromadzone dane glebowe obejmują charakterystykę gleboznawczą pola oraz właściwości chemiczne gleb. Aktualnie wykorzystywana informacja jest dostępna

w formie numerycznej, która powstała w wyniku digitalizacji analogowej mapy glebo-rolniczej wykonanej w skali 1:1000 klasyczną metodą kartograficzną, z ręcznym wyznaczeniem obszarów o podobnym składzie granulometrycznym i zaszeregowaniem do poszczególnych kompleksów przydatności rolniczej. Proces tworzenia tej mapy opierał się na szczegółowym rozpoznaniu pola w latach 1993–1995. W pierwszej kolejności na podstawie analizy ukształtowania terenu i zmienności gleb dokonano wstępnych wydzielení przestrzennych, w których zlokalizowano odkrywki zasadnicze (łącznie 23 odkrywki). Na podstawie morfologii i składu granulometrycznego oznaczonego metodą palcową określono typy, gatunki i kompleksy przydatności rolniczej gleb. Jednocześnie z poszczególnych warstw profili pobierano próbki do analiz laboratoryjnych celem uściślenia wyników badań terenowych. Dla wyznaczenia zasięgów poszczególnych jednostek glebowych wykonano 968 odkrywek pomocniczych do głębokości 50–60 cm, pogłębianych świdrem do 150 cm. Odkrywki pomocnicze zlokalizowano w oczkach siatki kwadratów o boku 25 m, pokrywającej całe pole doświadczalne. W próbkach pobranych z poziomu próchnicznego gleby określono jej żyzność na podstawie oznaczeń metodami klasycznymi: pH w KCl, zawartość przyswajalnego fosforu i potasu metodą Egnera-Riehma, zawartość magnezu metodą Schachtschabela oraz próchnicy metodą Tiurina.

Zebrana pierwotnie informacja o stanie pola jest systematycznie uzupełniana o nowe wyniki analiz i pomiarów. W miarę pojawiania się, na pole wprowadzane są również coraz to nowe rozwiązania techniczne. W latach 1996–1999 badania wykonywano corocznie w polu płodozmiennym pszenicy ozimej. Obecnie badania gleby prowadzone są w cyklach 3-letnich (lata: 1999, 2002, 2005, 2008, 2011, 2014) w oczkach siatki kwadratowej o boku 36 m pokrywającej cały obszar pola doświadczalnego. Są to łącznie 403 punkty pomiarowe o ustalonych współrzędnych geograficznych. Współrzędne takie umożliwiają tworzenie map plonów uprawianych roślin, zasobności gleby i jej właściwości fizykochemicznych (13). W 2008 r. w pobranych próbkach glebowych po raz pierwszy wykonano pełne oznaczenia składu granulometrycznego gleby nową w Polsce metodą laserową wprowadzoną w latach 2005/2006 przez okręgowe stacje chemiczno-rolnicze. Analizy gleb wykonała dla tego pola OSChR w Lublinie. W oroku 2014 analiza zasobności gleb w P, K i Mg została wykonana w GLACH IUNG-PIB z zastosowaniem uniwersalnej ekstrakcji nową metodą Mehlich 3 (14), którą planuje się wprowadzić do szerokiej praktyki badań agrochemicznych w Polsce.

Ze względu na to, że stosowane dotychczas klasyczne metody pobierania próbek glebowych oraz precyzyjnego określania stanu odżywienia roślin metodą punktowego pobierania i analizy próbek są niesłychanie pracochłonne i kosztowne, wciąż poszukuje się metod pomiarów ciągłych. Notowany w ostatnich latach postęp techniczny w aparaturze pomiarowej umożliwia coraz częstsze wykorzystywanie technik pośredniej oceny właściwości gleby i stanu roślin. Służą do tego różnego rodzaju mobilne czujniki (on-the-go) rejestrujące z dużą rozdzielczością właściwości gleby i roślin

w czasie rzeczywistym, bezpośrednio na polu. Wyniki analiz metodami klasycznymi wykorzystuje się do kalibracji pomiarów ciągłych.

Konstrukcja tych czujników oparta jest na metodach elektromagnetycznych i spektrometrycznych. Do najczęściej stosowanych czujników elektromagnetycznych należy konduktometr przewodności elektrycznej EM 38MK2 Geonics Ltd (Canada). Zmierzona wartość przewodności elektrycznej gleby koreluje z podstawowymi jej cechami, jak: skład granulometryczny, zasolenie, zawartość wody i zawartość substancji organicznej. Jest ona zatem z dużym powodzeniem wykorzystywana do charakteryzowania przestrzennej zmienności wymienionych cech gleby (23, 24, 31). Podstawy teoretyczne do wykorzystania tej metody w celu oceny właściwości gleb zostały stworzone przez Rhoedsa i in. (31). Wielu badaczy, posługując się metodą elektrometryczną, wykazało jej przydatność do określania w skali pola zawartości wody (20, 32), zawartości ilu (35), a także pojemności sorpcyjnej i zawartości wymiennych form Ca i Mg (22). Metoda znalazła również szerokie zastosowanie przy wyznaczaniu stref o zróżnicowanym składzie granulometrycznym (10, 21, 30) oraz typów gleb (2, 17). Johnson i in. (18) dokonali oceny metody przewodności elektrycznej do wyznaczenia wielu fizycznych, chemicznych i biologicznych właściwości, które wpływały na plonowanie roślin i potencjał ekologiczny obszarów rolniczych.

Coraz częściej stosowanymi urządzeniami do określania zmienności glebowej na potrzeby tworzenia map zasobności są mobilne spektrofotometry pracujące w zakresie światła widzialnego i bliskiej podczerwieni (VIS/NIR). Za pomocą spektrofotometru VIS/NIR można określić zawartość azotu, potasu, fosforu, magnezu, wapnia, próchnicy, skład granulometryczny, pH i wiele innych cech gleby (1, 6, 8, 33). Metody „on-the-go” stosowane są obecnie szeroko w rolnictwie precyzyjnym wielu krajów, m.in. USA, Australii i Europy Zachodniej. Są również coraz częściej stosowane w Polsce zarówno w badaniach, jak i praktyce rolniczej (6, 26, 30).

Celem badań własnych było porównanie metod klasycznych i metod „on-the-go” do określania przestrzennej zmienności właściwości fizykochemicznych gleb oraz łanu roślin i plonu w skali ustalonego pola doświadczalnego.

Metodyka badań

Badania prowadzono na terenie specjalistycznej Stacji Doświadczalnej IUNG-PIB w Baborówku koło Poznania (16°38'50 E, 52°34'50 N) w latach 2009–2012. Ukształtowanie terenu stacji doświadczalnej charakteryzuje się płaską powierzchnią, na której lokalne deniwelacje nie przekraczają 2–3 metrów w skali pola. Pole podzielono na 3 pola płodozmienne z przeznaczeniem pod uprawę rzepaku ozimego, pszenicy ozimej

i jęczmienia jarego. Powierzchnia całego pola wynosiła ok. 52 ha. Wszystkie zabiegi agrotechniczne, łącznie z nawożeniem, stosowane były jednolicie na powierzchni całego pola. Bliższą charakterystykę pola przedstawiono we wcześniejszych publikacjach (9, 13, 16).

Wyniki badań

Ocena przestrzennej zmienności właściwości gleby metodami klasycznymi

Na pierwszym etapie badań dokonano przestrzennej analizy właściwości fizykochemicznych gleby pola doświadczalnego na podstawie analiz laboratoryjnych 399 próbek glebowych pobranych w wierzchołkach regularnej siatki kwadratów o boku 36 m (fot. 1). Próbki gleby pobrano z warstwy ornej 0–30 cm. Wszystkie analizy wykonano w Głównym Laboratorium Analiz Chemicznych IUNG-PIB w Puławach klasycznymi metodami przyjętymi w Polsce. Wyniki analiz przedstawiono w tabeli 1.



Fot. 1. Punkty poboru próbek glebowych do analiz fizykochemicznych (n = 399)

Źródło: opracowanie własne

Tabela 1

Podstawowe statystyki właściwości fizykochemicznych gleb (n = 399)

Podstawowe statystyki	pH	P ₂ O ₅	K ₂ O	Mg	SOC	Piasek 2–0,05mm	Pył 0,05–0,002mm	Ił <0,002mm
		mg 100 g ⁻¹ gleby			%	%		
Średnia	6,2	16,0	13,9	7,3	1,19	78	20	2
Mediana	6,3	14,3	13,2	7,2	1,15	77	20	2
Odch. st.	0,48	8,0	4,56	2,26	0,24	5,6	4,9	0,6
Minimum	4,62	4,4	5,10	2,60	0,68	64	6	0
Maximum	7,65	58,	44,50	15,90	2,68	94	32	4

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie uzyskanych wyników sporządzono cyfrowe mapy badanych właściwości fizykochemicznych gleb (rys. 6–12). Obszar objęty analizami posłużył na późniejszych etapach badań do oceny możliwości wykorzystania czujników glebowych w analizie przestrzennej właściwości fizykochemicznych gleb.

Ocena przestrzennej zmienności glebowej metodami „on-the-go”

Do oceny przestrzennej zmienności gleb w obrębie pola produkcyjnego wykorzystano dwa urządzenia: konduktometr EM 38MK2 oraz mobilny spektrofotometr VIS-NIR (Veris Technologies, USA). Urządzenia te posłużyły podczas realizacji badań przede wszystkim do rozpoznania zasięgów zróżnicowanych konturów glebowych oraz szacowania niektórych właściwości fizykochemicznych gleb.

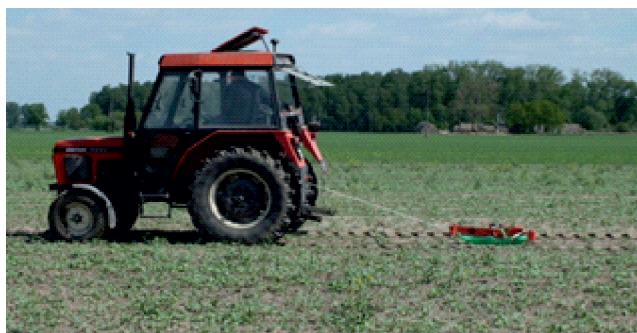
Konduktometr elektromagnetyczny EM 38MK2 (Geonics Ltd. Canada)

Konduktometr elektromagnetyczny (fot. 2 i 3) umożliwia pomiar elektromagnetycznych właściwości gleby w dwóch orientacjach: poziomej EC_H (pomiar do głębokości 75 cm) i pionowej EC_V (pomiar do głębokości 150 cm). Zasada jego działania polega na indukcji pola magnetycznego w profilu glebowym. Konduktometr składa się z dwóch cewek: nadawczej i odbiorczej. W cewce nadawczej jest wytwarzany prąd o niskiej częstotliwości, który generuje zmienne pole magnetyczne. Tak wytworzone pierwotne pole magnetyczne wnika do ośrodka glebowego, powodując w nim wtórną indukcję magnetyczną wytworzoną przez prądy wirowe. Wtórne pole magnetyczne wygenerowane w ośrodku zostaje zmierzone w cewce odbiorczej również na zasadzie indukcji magnetycznej, powodując przepływ prądu. Sygnał przesyłany z miernika informuje komputer zbierający dane o ustawieniu cewek (pionowe bądź poziome). Siła wytwarzanego wtórnego pola magnetycznego jest proporcjonalna do przewodności elektrycznej gleb.

Konduktometr elektromagnetyczny EM 38 podczas pomiaru nie wymaga bezpośredniego kontaktu z badanym ośrodkiem, dzięki czemu nie dochodzi do zmian w strukturze badanej gleby.



Fot. 2. Konduktometr EM 38 MK2 Geonics Ltd. (Canada)
(fot. J. Niedźwiecki)



Fot. 3. Pomiar przewodności elektrycznej konduktometrem EM 38 MK2
(fot. J. Niedźwiecki)

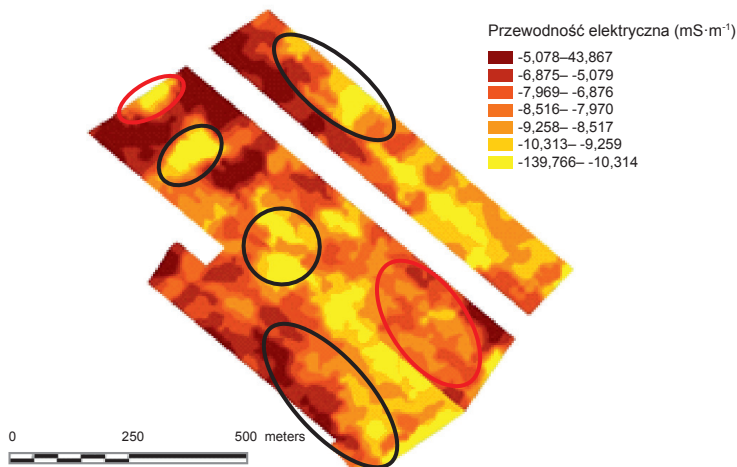
O dużej rozdzielczości pomiaru zmienności przestrzennej decyduje interwał pomiaru.

W pomiarach zastosowano metodę z interwałem 1 Hz, co pozwoliło na uzyskanie około 200 punktów na ha. Taki duży zestaw danych jest wystarczający do odwzorowania rzeczywistej zmienności właściwości gleb.

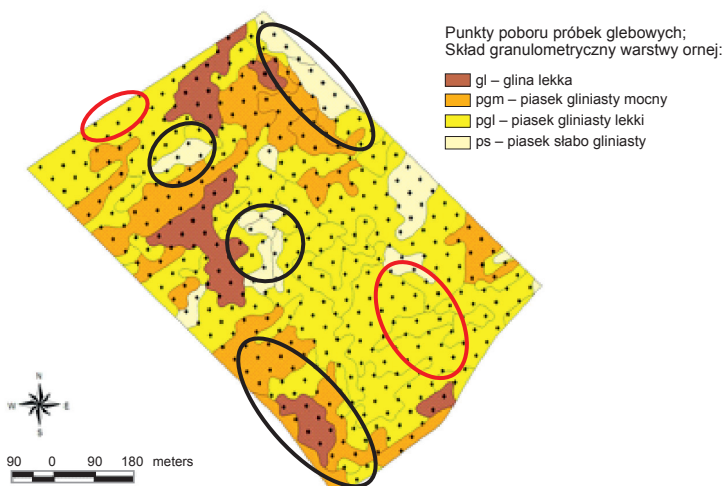
Wyniki badań przewodności elektrycznej EC gleby

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów stwierdzono, że zróżnicowanie przestrzenne przewodności elektrycznej gleby, mierzone czujnikiem EM 38, dobrze odwzorowuje przestrzenną zmienność jej uziarnienia (rys. 1). Poligony charakteryzujące się wyższymi wartościami EC odpowiadają cięższym utworom glebowym, natomiast niższe wartości EC notowano na obszarach występowania gleb lekkich i bardzo lekkich z większą rozdzielczością niż mapa glebowa wykonana metodą tradycyjną (rys. 2). Wartość przewodności elektrycznej nie określa bezpośrednio zasobności gleby w dany składnik, a jedynie wskazuje na anomalie związane ze zmianą uziarnienia, a więc cechy skorelowanej ze składem granulometrycznym. Z tego względu mapy

EC mogą być pomocne przy wyborze miejsc do poboru próbek glebowych przy podejmowaniu decyzji związanych z agrotechniką i wyznaczaniu stref dla precyzyjnego dawkowania nawozów.



Rys. 1. Mapa zmienności EC: kontury pokrywające się z mapą glebową (zaznaczone na czarno) i poligony, których nie uwzględnia mapa glebową (zaznaczone na czerwono)
Źródło: opracowanie własne



Rys. 2. Mapa zmienności składu granulometrycznego gleb; poligony jak na rys. 1.
Źródło: opracowanie własne

Wyniki badań cech spektralnych gleby

System pomiarowy Veris składa się ze spektrofotometru oraz platformy jezdnej mocowanej do ciągnika (fot. 4). Spektrofotometr VIS-NIR może być w zależności od potrzeb montowany na platformie, bądź po zdemontowaniu wykorzystywany jako urządzenie laboratoryjne. Głównym elementem umożliwiającym pomiary spektralne jest specjalnie skonstruowany lemiesz, w którym znajduje się lampa halogenowa jako źródło światła (fot. 5). Podczas jazdy lemiesz zagłębia się na gł. ok. 5–7 cm. Dzięki temu pomiar wykonywany jest w warstwie powierzchniowej gleby. Lampa oświetla powierzchnię gleby, a światło, które odbija się od gleby poprzez przewody światłowodowe pada na detektory umieszczone w spektrofotometrze. Spektrofotometr mierzy ilość światła odbitego oraz absorbowanego przez glebę. Zakres pomiarowy spektrofotometru Veris wynosi od 350 do 2200 nm. W każdej sekundzie system Veris rejestruje 20 widm glebowych (rys. 3).

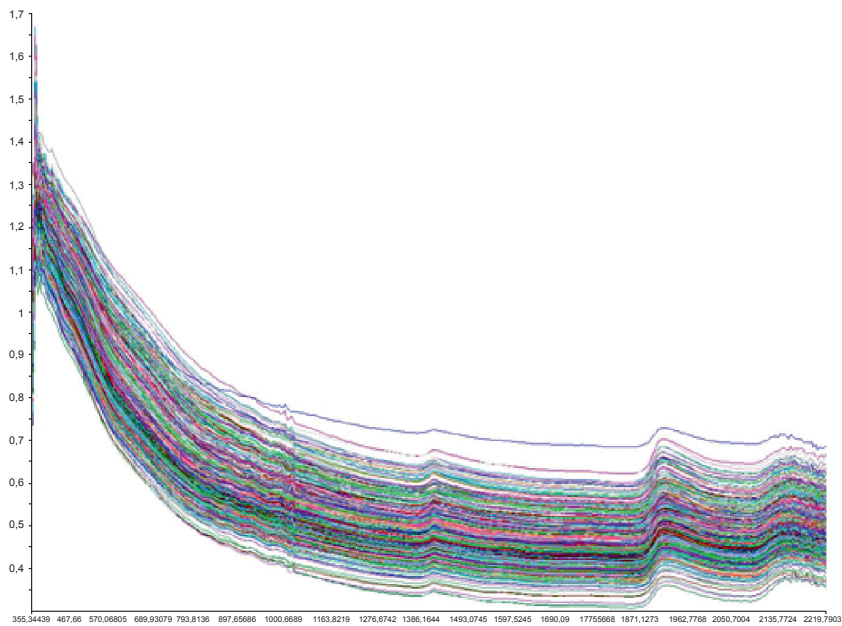
Zastosowanie w badaniach spektrofotometru bliskiej podczerwieni NIR oraz światła widzialnego VIS umożliwiło pomiary spektralne gleb w celu określenia m.in. zawartości węgla organicznego, odczynu gleb oraz zawartości niektórych makroelementów (7). Urządzenie współpracuje z GPS, co umożliwia sporządzanie cyfrowych map badanych właściwości gleby (rys. 6–12). Zaletą systemu Veris jest możliwość określenia wielu parametrów glebowych podczas jednego przejazdu.



Fot. 4. Pomiar właściwości spektralnych gleb systemem Veris
(fot. J. Niedźwiecki)



Fot. 5. Lemiesz z umieszczoną wewnątrz lampą halogenową podczas pomiarów spektralnych
(fot. J. Niedźwiecki)



Rys. 3. Widma spektralne badanych gleb (R – światło odbite)

Źródło: Niedźwiecki i Debaene, 2013 (25)

Chemometryczną analizę danych spektralnych oraz kalibrację i walidację opracowanych modeli predykcyjnych wykonano za pomocą oprogramowania Unscrambler X[®] version 10.1 (Camo AS, Oslo, Norway). Do określenia najlepszych związków pomiędzy fizykochemicznymi właściwościami i danymi spektralnymi zastosowano modele cząstkowe najmniejszych kwadratów (PLS) (partial least squares regression). Dokładność kalibracji oceniono na podstawie współczynników determinacji R^2 , ilości zmiennych ukrytych, RMSEP błędów predykcji i RPD (ratio of performance deviation) obliczonych na podstawie zależności między zmierzonymi i przewidywanymi właściwościami walidowanych właściwości. Błędy predykcji oceniano na podstawie kroswalidacji.

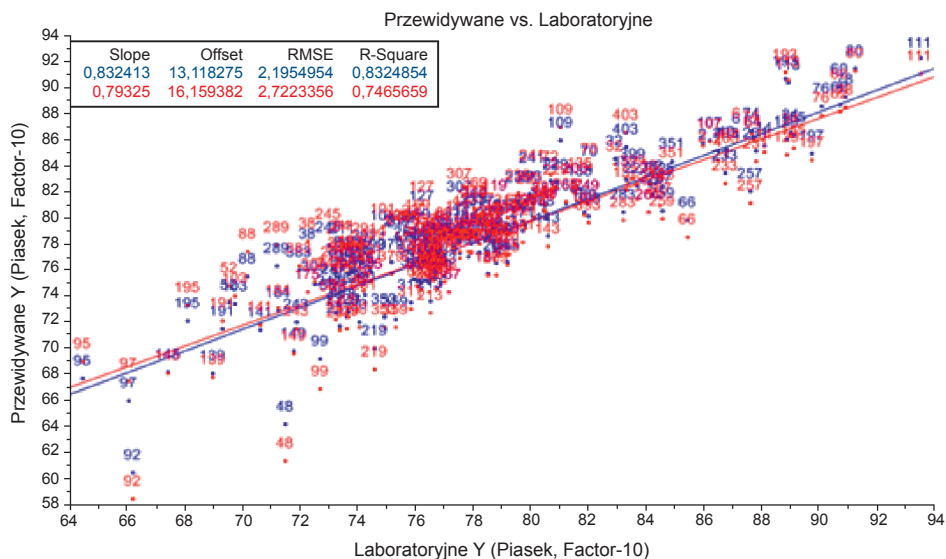
Wyniki analizy PLS wykazały, że najlepsze modele predykcyjne otrzymano dla frakcji piasku ($R^2 = 0,78$; RMSEP = 2,64; RPD = 2,1), pyłu ($R^2 = 0,78$; RMSEP = 2,35; RPD = 2,09), nieco słabsze dla węgla organicznego ($R^2 = 0,73$; RMSEP = 0,11; RPD = 2,1) i frakcji iłu ($R^2 = 0,75$; RMSEP = 0,32; RPD = 1,97). Dla pozostałych właściwości gleby uzyskano nieco mniejsze wartości predykcyjne modeli (tab. 2). Otrzymane modele posłużyły na późniejszym etapie badań do sporządzenia cyfrowych map oszacowanych właściwości fizykochemicznych gleb. Na podstawie przeprowadzonych analiz sporządzono wykresy kalibracyjne i walidacyjne oraz modele predykcyjne badanych właściwości gleby. Przykładowe wykresy przedstawiono na rysunkach 4 i 5. Na podstawie modeli predykcyjnych oszacowano badane właściwości i sporządzono ich cyfrowe mapy.

Tabela 2

Wyniki analiz modeli cząstkowych najmniejszych kwadratów (PLS) badanych właściwości gleb

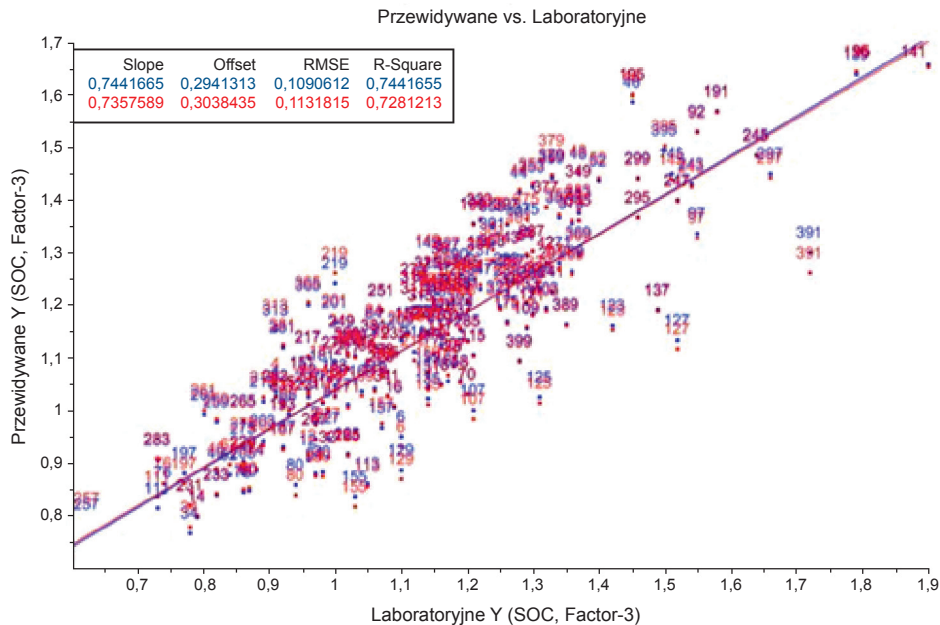
Właściwość gleby	Kalibracja		Kroswalidacja		Walidacja		
	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSEP	RPD
SOC (%)	0,73	0,11	0,66	0,13	0,73	0,11	2,10
Piasek (%)	0,84	2,19	0,75	2,72	0,78	2,64	2,10
Pył (%)	0,83	1,95	0,74	2,44	0,78	2,35	2,09
H (%)	0,78	0,28	0,68	0,34	0,75	0,32	1,97
pH	0,57	0,32	0,48	0,36	0,52	0,34	1,28
Mg (mg·100 g ⁻¹)	0,56	1,48	0,51	1,55	0,50	1,62	1,24
P ₂ O ₅ (mg·100 g ⁻¹)	0,53	5,56	0,36	6,46	0,43	6,07	1,11
K ₂ O (mg·100 g ⁻¹)	0,55	2,90	0,44	3,27	0,51	3,50	1,31

Źródło: Debaene i in., 2014 (6), zmodyfikowane



Rys. 4. Przykładowe wykresy – kalibracyjny (niebieski) i walidacyjny (czerwony), dla frakcji piasku (%)

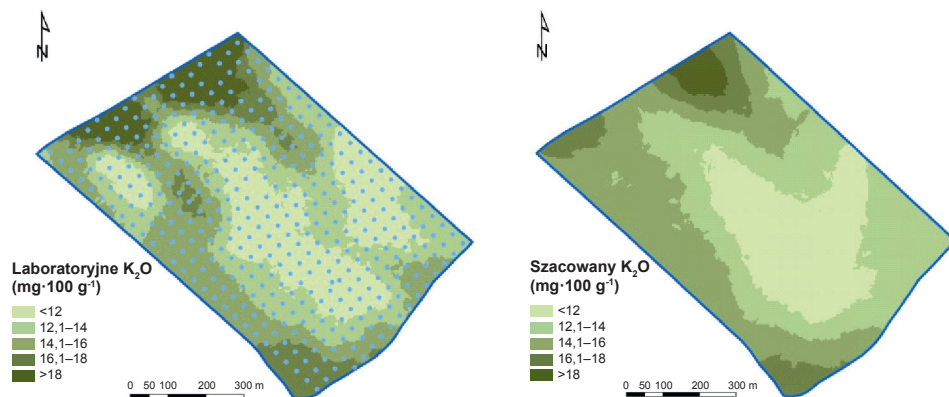
Źródło: Debaene i in., 2014 (6), zmodyfikowane



Rys. 5. Przykładowe wykresy – kalibracyjny (niebieski) i walidacyjny (czerwony), dla węgla organicznego SOC (%)

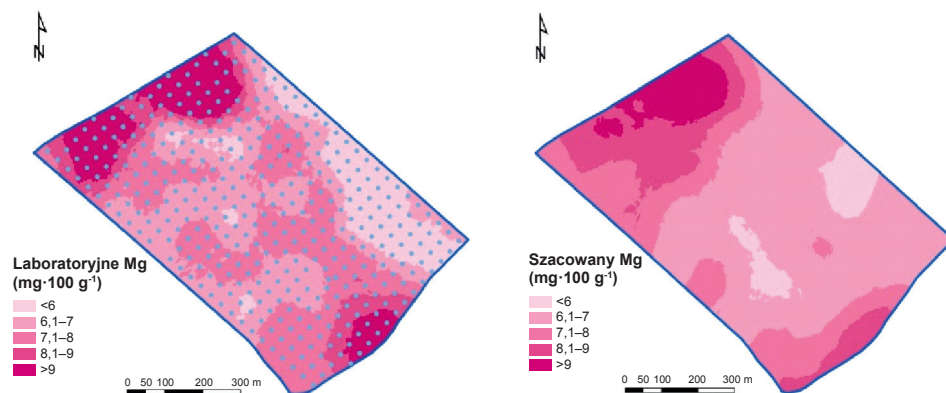
Źródło: Debaene i in., 2014 (6), zmodyfikowane

W kolejnym etapie badań porównano mapy właściwości fizykochemicznych określonych na podstawie wyników uzyskanych metodami klasycznymi ze stałych punktów siatki (po lewej) z wynikami oszacowanymi na podstawie opracowanych modeli predykcyjnych z pomiarów spektralnych gleby (po prawej). Do interpolacji map zastosowano metodę krigingu zwyczajnego (rys. 6–12).



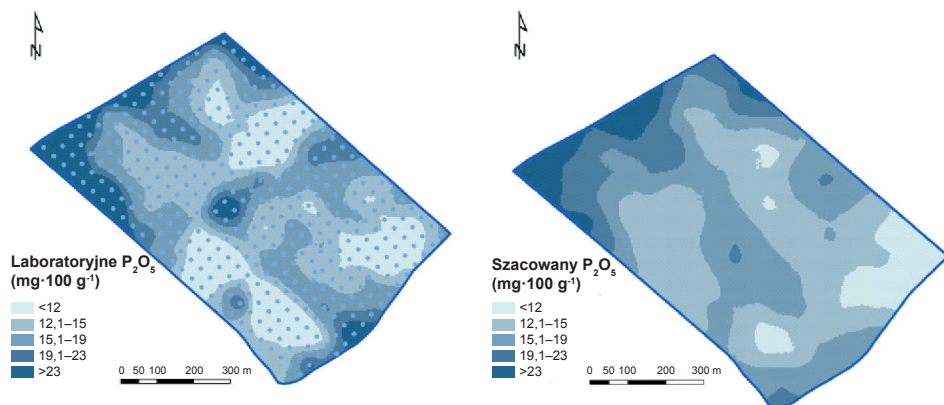
Rys. 6. Zawartość potasu przyswajalnego K_2O

Źródło: opracowanie własne

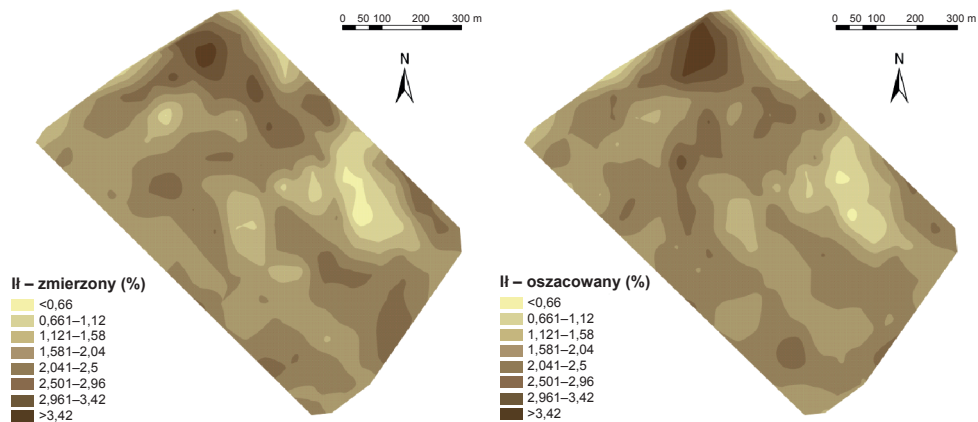


Rys. 7. Zawartość magnezu przyswajalnego Mg

Źródło: opracowanie własne

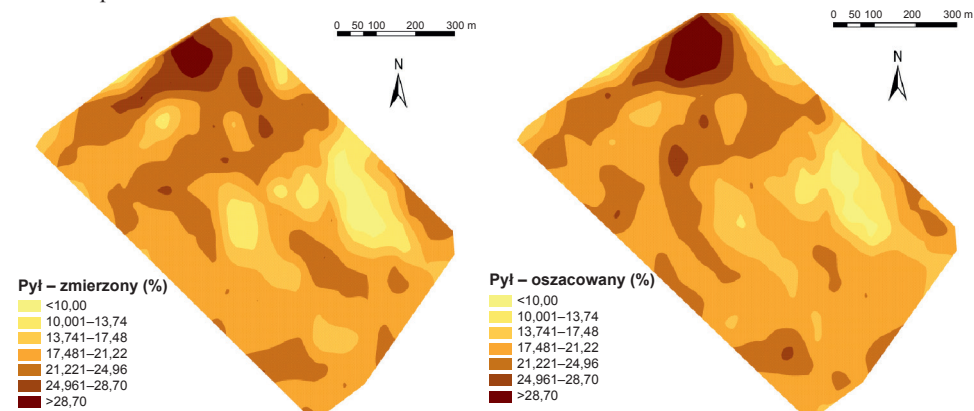
Rys. 8. Zawartość fosforu przyswajalnego P_2O_5

Źródło: opracowanie własne



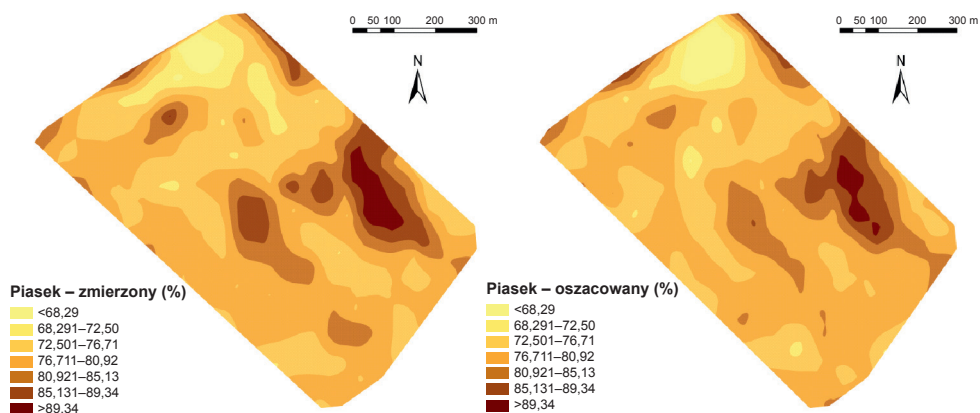
Rys. 9. Zawartość frakcji iltu

Źródło: opracowanie własne



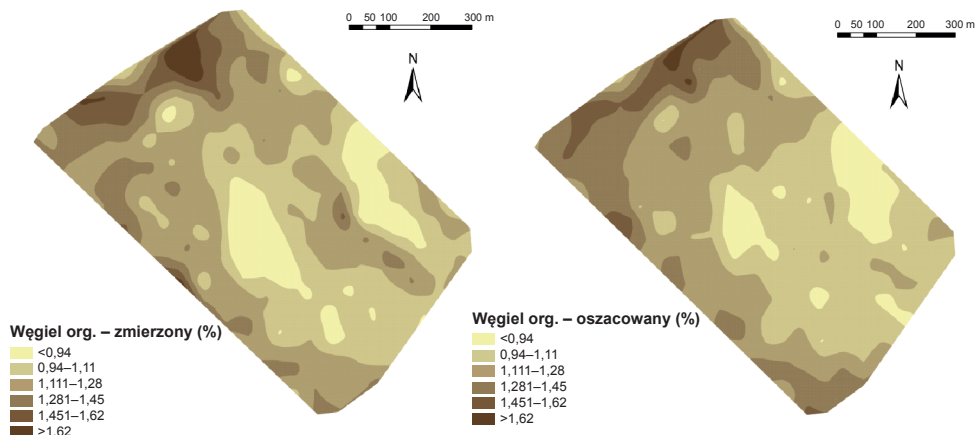
Rys. 10. Zawartość frakcji pyłu

Źródło: opracowanie własne



Rys. 11. Zawartość frakcji piasku

Źródło: opracowanie własne



Rys. 12. Zawartość węgla organicznego

Źródło: opracowanie własne

Metodyka oceny przestrzennej zmienności ładu roślin uprawnych oraz plonu

Znormalizowany wskaźnik zieleni (Indeks NDVI)

W rolnictwie precyzyjnym do charakteryzowania właściwości ładu roślin wykorzystuje się zależności między ilością światła pochłanianego przez rośliny przy różnych długościach fal. Uzyskany wynik wyrażany jest za pomocą wskaźników roślinnych. Jednym z najczęściej używanych jest znormalizowany wskaźnik wegetacji NDVI (Normalized Difference Vegetation Index):

$$NDVI = (NIR - RED)/(NIR + RED)$$

gdzie:

NIR – ilość światła odbitego w zakresie bliskiej podczerwieni;

RED – ilość światła odbitego w zakresie światła czerwonego.

Wskaźnik NDVI ma pośredni związek z właściwościami gleby, ponieważ stan łanu roślin jest odzwierciedleniem stanu jakości gleb. W celu skorelowania stanu wegetacji roślin z przestrzenną zmiennością glebową wykonano pomiary indeksu NDVI. Indeks NDVI został określony za pomocą mobilnego sensora optycznego GreenSeeker RT 200 (NTech, USA) zainstalowanego na ciągniku rolniczym (fot. 6). Wskaźnik NDVI jest dobrym parametrem opisującym stan roślinności (34), skorelowanym z jej biomasą (19). Przyjmuje się, że łan roślin jest w dobrej kondycji i nie podlega stresom, jeżeli wskaźnik NDVI wynosi ponad 0,6. Średnio wartości NDVI dla roślinności wahają się od 0,4 do 0,8.

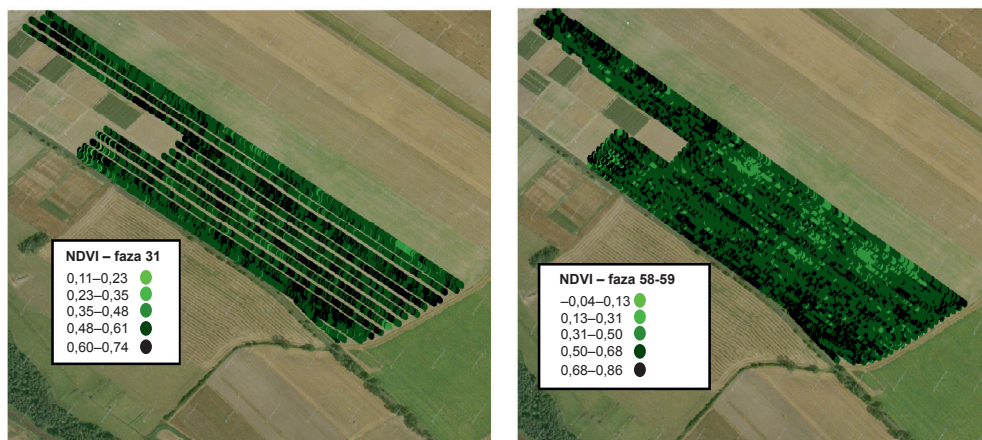


Fot. 6. Czujnik optyczny GreenSeeker RT 200 (NTech, USA) podczas pomiarów
(fot. J. Niedźwiecki)

Pomiary indeksu NDVI wykonano w 4 fazach fenologicznych pszenicy ozimej:

- 1) widoczne pierwsze kolanko (F 31);
- 2) widoczne trzecie kolanko (F 33);
- 3) koniec kłoszenia – kłosy całkowicie widoczne (F 58-59);
- 4) pełnia kwitnienia (F 64-65).

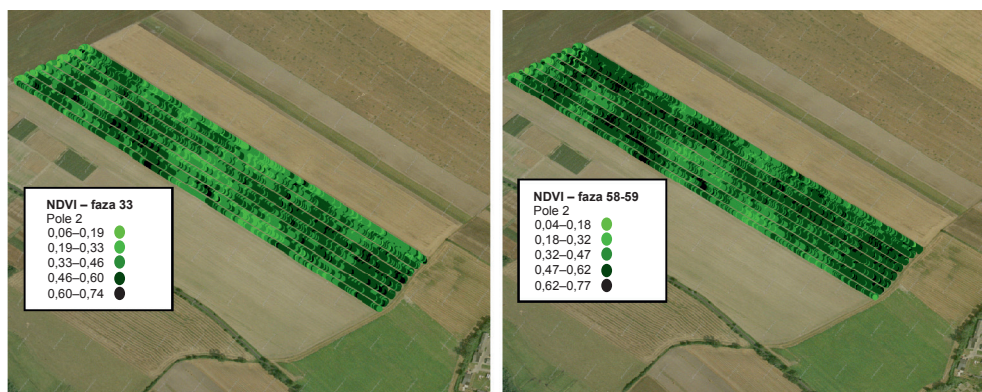
Uzyskane wyniki pomiarów NDVI posłużyły do wygenerowania map przestrzennej zmienności tego wskaźnika dla pól produkcyjnych SD Baborówko w kluczowych dla rozwoju pszenicy fazach fenologicznych (rys. 13–16).



Rys. 13. Mapy indeksu NDVI dla pól produkcyjnych w fazie 31 (po lewej) i 58-59 (po prawej)
 Źródło: opracowanie własne



Rys. 14. Mapa Indeksu NDVI dla pola produkcyjnego w fazie 64-65
 Źródło: opracowanie własne



Rys. 15. Mapy indeksu NDVI dla pól produkcyjnych w fazie 33 (po lewej) i 58-59 (po prawej)
 Źródło: opracowanie własne

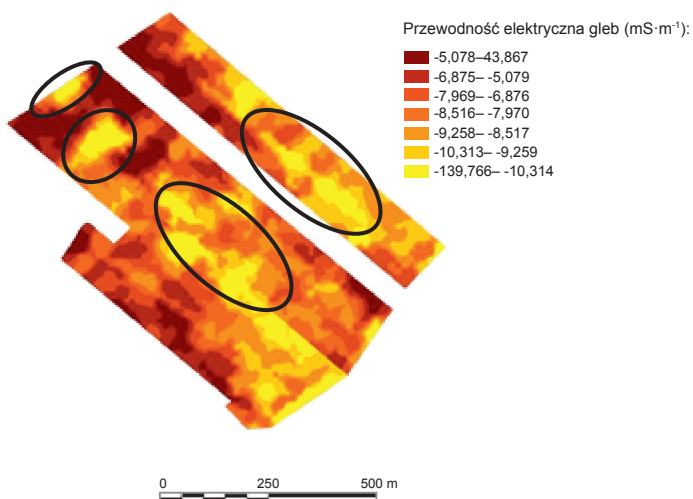


Rys. 16. Mapa Indeksu NDVI dla pola produkcyjnego w fazie 64-65

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie uzyskanych map indeksu NDVI stwierdzono, że niższe wartości indeksu pokrywały się z obszarami występowania gleb najlżejszych, najmniej zasobnych w składniki pokarmowe dostępne dla roślin. Największe przestrzenne zróżnicowanie NDVI stwierdzono podczas fazy 64-65 (pełnia kwitnienia) pszenicy.

Poniżej przedstawiono porównanie map przestrzennej zmienności glebowej określonej za pomocą konduktometru EM 38 (rys. 17) na tle przestrzennego zróżnicowania indeksu NDVI (rys. 18) i produktywności pola produkcyjnego (rys. 19). Obramowaniem zaznaczono obszary charakteryzujące się najniższymi wartościami EC, NDVI i produktywności pola.



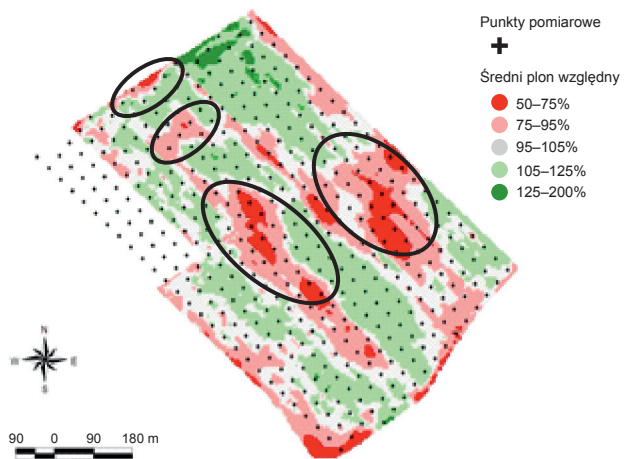
Rys 17. Mapa przestrzennej zmienności EC

Źródło: opracowanie własne



Rys. 18. Mapa przestrzennego zróżnicowania indeksu NDVI

Źródło: opracowanie własne



Rys. 19. Mapa produktywności pola

Źródło: Fotyma i Pecio, 2010 (13)

Podsumowanie

1. Przeprowadzone badania wykazały przydatność czujników „on-the-go” do określania przestrzennej zmienności różnych właściwości glebowych w skali pola.
2. Zarówno czujniki elektromagnetyczne, jak i optyczne dobrze odwzorowują rzeczywistą zmienność cech glebowych na polu produkcyjnym.
3. Pomiary spektralne gleby w zakresie bliskiej podczerwieni w połączeniu analizami chemometrycznymi dają bardzo duże możliwości szacowania wielu istotnych z punktu widzenia agrotechniki cech glebowych.
4. Porównanie różnych rodzajów danych przestrzennych może być pomocne w opracowaniu map potencjału plonotwórczego pola oraz wyznaczaniu stref technologicznych dla zmiennego dawkowania nawozów mineralnych.

Literatura

1. Adamchuk V.I., Hummel J.W., Morgan M.T., Upadhyaya S.K.: On-the-go soil sensors for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2004, **44**: 71-91.
2. Anderson-Cook C.M., Alley M.M., Roygard J. K.F., Khosla R., Noble R.B., Doolittle J.A.: Differentiating soil types using electromagnetic conductivity and crop yield maps. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2002, **66**: 1562-1570.
3. Błaszczuk L.: Geostatystyczna analiza zmienności przestrzennej plonu ziarna pszenicy ozimej w warunkach pola produkcyjnego. *Fragm. Agron.*, 2001, **2**: 28-36.
4. Błaszczuk L.: Wykorzystanie wskaźnika LAI w interpolacji plonu ziarna pszenicy ozimej metodą co-krigingu. *Fragm. Agron.*, 2002, **3**: 4-12.
5. Błaszczuk L., Fotyma M.: Zastosowanie metody obserwacji naukowych do badania przyczyn zmienności plonów pszenicy w obrębie pola płodozmiennego. *Fragm. Agron.*, 2005, **1**: 678-688.
6. Debaene G., Niedźwiecki J., Pecio A., Żurek A.: Effect of the number of calibration samples on the prediction of several soil properties at the farm-scale. *Geoderma*, 2014, **2014-2015**: 114-125.
7. Debaene G., Niedźwiecki J., Pecio A.: On-the-go mapping of soil organic carbon content in Western Poland. *Proceedings of the 3rd Global Workshop on Proximal Soil Sensing*, 26–29 May 2013, Potsdam, Germany, 2013, pp. 248-251.
8. Debaene G., Niedźwiecki J., Pecio A.: Visible and near-infrared spectrophotometer for soil analysis: preliminary results. *Pol. J. Agr.*, 2010, **3**: 3-9.
9. Dobers E.S., Pecio A., Kubsik K., Naglik E., Fotyma M.: Baborówko Research Station. Farm records for the period 1992–2009. IUNG, Puławy 2011, pp. 137.
10. Doolittle J.A., Indorante S.J., Potter D.K., Hefner S.G., McCauley W.M.: Comparing three geophysical tools for locating sand blows in alluvial soils of southeast Missouri. *J. Soil Water Conserv.*, 2002, **57**: 175-182.
11. Faber A.: Zastosowanie sieci neuronowej i wskaźników stanu vegetacji w analizach produktywności łąnów pszenicy ozimej. *Fragm. Agron.*, 2000, **2**: 7-19.
12. Faber A., Jadczyk T.: Ocena zmienności przestrzennej plonów pszenicy ozimej w zależności od sposobu zbioru. *Fragm. Agron.*, 2001, **1**: 21-30.

13. F o t y m a M., P e c i o A.: Przestrzenna zmienność żyzności i produktywności gleby w obrębie pola produkcyjnego. Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization, 2010, **41**: 26-42.
14. F o t y m a M., K ę s i k K., L i p i ń s k i W., F i l i p i a k K., P u r c h a ł a L.: Testy glebowe jako podstawa doradztwa nawozowego. Studia i Raporty IUNG-PIB, 2015, **42(16)**: 9-52.
15. I g r a s J., K u b s i k K.: Dynamika zapasów wody w glebach różnych kompleksów w zależności od indeksu powierzchni liści i akumulacji suchej masy pszenicy ozimej. *Fragm. Agron.*, 1999, **1**: 39-48.
16. J a d c z y s z y n T.: Ustalanie dawek nawozów P, K, Mg w rolnictwie precyzyjnym. Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization, 2010, **41**: 43-50.
17. J a y n e s D.B., C o l v i n T.S., A m b u e l J.: Soil type and crop yield determinations from ground conductivity surveys. ASAE Paper 933552, 1993, ASAE, St. Joseph, MI.
18. J o h n s o n C.K., D o r a n J.W., D u k e H.R., W e i n h o l d B.J., E s k r i d g e K.M., S h a n a h a n J.F.: Field-scale electrical conductivity mapping for delineating soil condition. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2001, **65**: 1829-1837.
19. J u s t i c e C.O., H i e r n a u x P.H.Y.: Monitoring the grasslands of the Sahel using NOAA AVHRR data. *Int. J. Remote Sens.*, 1986, **7**: 1475-1498.
20. K a c h a n o s k i R.G., G r e g o r i c h E.G., V a n W e s e n b e e c k I.J.: Estimating spatial variations of soil water content using noncontacting electromagnetic inductive methods. *Can. J. Soil Sci.*, 1983, **68**: 715-722.
21. K i t c h e n N.R., S u d d u t h K.A., D r u m m o n d S.T.: Mapping of sand deposition from 1993 midwest floods with electromagnetic induction measurements. *J. Soil Water Conserv.*, 1996, **51**: 336-340.
22. M c B r i d e R.A., G o r d o n A.M., S h r i v e S.C.: Estimating forest soil quality from terrain measurements of apparent electrical conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1990, **54**: 290-293.
23. M c N e i l l J.D.: Rapid, accurate mapping of soil salinity by electromagnetic ground conductivity meters. In: *Advances in Measurement of Soil Physical Properties: Bringing Theory Into Practice*, G.C. Topp, W.D. Reynolds and R.E. Green (eds.). Spec. Publ., 1992, **5**: 30. SSSA, Madison, WI, ss. 209-229.
24. M u e l l e r T.G., H a r t s o c k N.J., S t o m b a u g h T.S., S h e a r e r S.A., C o r n e l i u s P.L., B a r n h i s e l R.I.: Soil electrical conductivity map variability in limestone soils overlain by loess. *Agron. J.*, 2003, **96**: 496-507.
25. N i e d ź w i e c k i J., D e b a e n e G.: Nowoczesne metody chemometryczne oznaczania substancji organicznej w glebach. Studia i Raporty IUNG-PIB, 2013, **35(9)**: 199-212.
26. N i e d ź w i e c k i J., D e b a e n e G., P u d e ł k o R.: Electrical conductivity analysis of field of highly variable soils. Proceedings of the 3rd Global workshop on proximal soil sensing (International Union of Soil Sciences), 26–29 May 2013, Potsdam, Germany. R. Gebbers, E. Lück and J. Rühlmann (eds). Publisher: Leibniz- Institute for agricultural engineering. ISSN 0947-7314, pp. 288-292.
27. P e c i o A., B ł a s z c z y k L.: Geostatystyczna analiza przestrzennej zmienności azotu mineralnego w glebie w warunkach pola produkcyjnego. Nawozy i Nawożenie – Fertilizers and Fertilization, 2002, **1**: 66-75.
28. P e c i o A., K u b s i k K., B i c h o ń s k i A.: Analiza przestrzennej zmienności plonu i zawartości białka w ziarnie jęczmienia jarego w obrębie pola produkcyjnego. *Biul. IHAR*, 2005a, **236**: 147-155.
29. P e c i o A., K u b s i k K., B i c h o ń s k i A.: Przyczyny zmienności plonu i jakości ziarna jęczmienia jarego w obrębie pola produkcyjnego. *Biul. IHAR*, 2005b, **236**: 157-166.
30. P u d e ł k o R., N i e d ź w i e c k i J., D e b a e n e G., I g r a s J., K u b s i k K.: The remote sensing assessment of potential productivity of a field with soil spatial variability. *J. Food Agric. Environ.*, 2012, **10(2)**: 790-793

31. R h o a d e s J.D., C o r w i n D.L., L e s c h S.M.: Geospatial measurements of soil electrical conductivity to assess soil salinity and diffuse salt loading from irrigation. In: Assessment of non-point source pollution in the vadose zone, D.L. Corwin, K. Loague and T.R. Ellsworth (eds). Geophysical Monograph 108 American Geophysical Union, Washington, DC, 1999, pp. 197-215.
 32. S h e e t s K.R., H e n d r i c k x J.M.H.: Noninvasive soil water content measurement using electromagnetic induction. *Water Resour. Res.*, 1995, **31**: 2401-2409.
 33. S t a f f o r d J.V.: Implementing precision agriculture in the 21st century. *J. Agr. Eng. Res.*, 2000, **76(3)**: 267-275.
 34. T u c k e r C.J.: Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sens. Environ.*, 1979, **8**: 127-150.
 35. W i l l i a m s B.G., H o e y D.: The use of electromagnetic induction to detect the spatial variability of the salt and clay contents of soils. *Aust. J. Soil Res.*, 1987, **25**: 21-27.
-

Adres do korespondencji:

dr inż. Jacek Niedźwiecki
Zakład Gleboznawstwa i Ochrony Gruntów
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8
24-100 Puławy
tel. (81) 886 34 21 w. 396
e-mail: jacekn@iung.pulawy.pl